

透平驱动湿气压缩机三级串联技术

胡 辉 李大全 周声结

中海石油(中国)有限公司湛江分公司

胡辉等.透平驱动湿气压缩机三级串联技术.天然气工业,2012,32(8):39-43.

摘 要 气田工况原因和下游用户对天然气的旺盛需求导致东方 1-1 气田中心平台湿气压缩机工程比原计划提前 4 年实施。该气田的复杂工况要求压缩机组工作区间必须非常宽、备用系数高、切换迅速,而海上施工条件又决定了湿气压缩机工程施工时无法整体预制吊装,工程时间紧,工程预算费用仅为合作气田同类项目的 1/3。为此,研发了透平驱动湿气压缩机三级串联工艺,利用机组喘振工艺,修改了湿气压缩机软件,使用入口旋流分离器和出口海水冷却器,通过喘振阀形成小循环把机组运转起来,实施精确控制,以实现多机组的切换和串联运行。并对其设备进行了国产化研究,通过实施内循环单机调试技术、组装式吊机海上吊装技术、电气系统不停产改造技术和总体配管优化技术,对设计施工调试技术进行了创新,实现了项目在预算内快速高质量投产。工程投用后每天增产天然气 $(40\sim 120)\times 10^4\text{ m}^3$,满足了复杂工况下的气田开发和下游天然气用户的生产需求。

关键词 东方 1-1 气田 湿气压缩机 三级串联 国产化 不停产 调试技术 吊装技术 自主设计

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2012.08.009

中国海洋石油有限公司东方 1-1 气田投产后,低烃井的 CO_2 含量普遍升高,高烃井的井口压力下降较快。为了满足下游用户对天然气的需求,增大了低烃高含 CO_2 气井的产量,利用湿气压缩机增压提高输量。但该气田的复杂工况要求压缩机组工作区间必须非常宽、备用系数高、切换迅速,而海上施工条件又决定了湿气压缩机工程施工时无法整体预制吊装,工程时间紧,工程预算费用仅为合作气田同类项目的 1/3^[1]。为此,研发了透平驱动湿气压缩机三级串联工艺,并对其设备国产化和设计施工调试技术进行了创新,实现了项目在预算内快速高质量投产。

1 透平驱动大功率高压湿气压缩机三级串联工艺

透平驱动大功率高压湿气压缩机本身工艺系统非常复杂,自成体系且完全自动化控制,在有限的空间通过增加阀门和管线来实现三级串联工艺系统设计是一个繁杂而系统的创新工程,该工艺设计不仅要满足机

组单机运行和互相切换、两台串联、先后启动和切换运行、三台串联和启动推出等,还要满足多工况启动、运行、停机、机组不同组合并入、退出、单机、二机串联和三机串联不停产调试、二机串联快速切换、转换、机组在不同运行工况下的具有高备用系数等要求。

根据压缩机的组合工况进行机组串联、切换工艺设计。机组切换、串联时上级压缩机组会对下一级机组产生巨大的冲击,为此,利用机组喘振工艺,修改了湿气压缩机软件,使用入口旋流分离器和出口海水冷却器,通过喘振阀形成小循环把机组运转起来,实施精确控制,以实现多机组的切换和串联运行。不同阶段压缩机的组合工况见表 1。

根据不同的工艺工况需求,机组在不同组合、不同工况下均运行在高效区,远离喘振区。透平选用同一型号(Taurus 70)。3 台离心式压缩机为同一系列,但叶轮大小、压比稍有差异,分为 LP、HP 和 SB。机组采用干气密封。

根据所提供的设计基础数据,压缩机的入口压力最大为 6 685 kPa,因此,分离器的设计压力为 7 300 kPa。

作者简介:胡辉,1977 年生,工程师,硕士;获中海石油总公司科技奖 2 项、管理创新奖 1 项,获广东省总工会技术发明奖 1 项,获专利 5 项。地址:(524057)广东省湛江市坡头区 22 号信箱合作楼 4 楼。电话:(0759)3911030,13531072007。E-mail:huhu@cnoc.com.cn

表 1 不同阶段压缩机的组合工况表

年份	机组组合	备用机工况
2006—2010	高压机工作	备用机处于备用
2011—2014	低压机+高压机	既可备用高压机,也可备用低压机
2015	低压机+高压机	负荷率高达 98%
2015	低压机+备用机+高压机	极端情况下无备用机
2016—2018	低压机+高压机	既可备用高压机,也可备用低压机
2019—2026	任一台机	推荐对备用机进行升级,以提高其效率(大于 80%)

2 相关设备技术创新及其国产化研究

2.1 湿气压缩机前置旋流分离器

2.1.1 相关设计

压缩机采用三级增压,每级压缩机前采用旋流分离器去除来气中的游离水及固体颗粒。为确保系统正常工作,要求各压缩机能够如以下模式工作:模式 1,

第一级、第二级和第三级前置分离器都可以作为第一级前置分离器使用;模式 2,第二级、第三级都可以作为第二级前置分离器使用;模式 3,第二级、第三级都可以作为第三级前置分离器使用。这就要求各旋流分离器在 3 种工况下都能够正常工作。为此,选用了具有高分离效率的导叶式旋风管(图 1)。前置旋流分离器的分离效率^[2]见表 2。

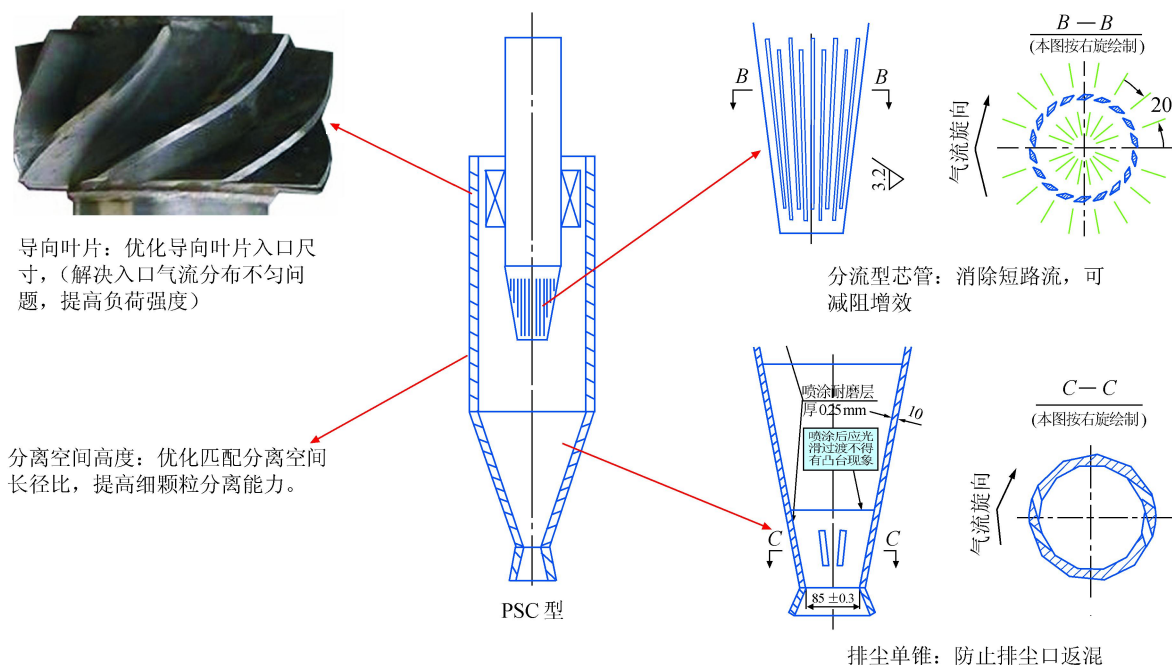


图 1 导叶式旋风管结构示意图

表 2 前置旋流分离器的分离效率表

分离对象	颗粒范围/ μm	分离效率
固体颗粒	1~10	99%
	>10	100%
液体颗粒	1~10	98%
	>10	100%

对旋风子的气液分离特性曲线进行了分析,试验结果表明:①气液分离效率随含液量降低而增大,因此

实际分离效率会更高;②气液分离效率随旋风子截面风速增大而下降,这与气固分离刚好相反;③气固、气液分离压降关系基本一致。因此,下面仅讨论压降关系特性。

2.1.2 设计计算

2.1.2.1 气固分离

设计基本原则是在许可压降下,为了保证高分离效率,使旋风子截面风速不低于 3.5 m/s。

1) 设定旋风子数量为 96,从而模拟计算出常温下

旋风子最大允许压降,并按工作参数计算得到旋风子实际压降值,比较二者可知,在此状态下旋风子实际压降值要比最大许可值小很多,也就是说在许可压降值范围内有较大的设计调节度。

2)为了保证较高的分离效率,设定旋风子工作表观截面风速,而后模拟计算在该表观截面风速下需要旋风子的数量及该工况下旋风子压降值的大小,并与该工况下旋风子许可最大压降值进行比较。比较结果可知,各工况下旋风子压降值均比许可最大压降值小,显然假定的旋风子表观截面风速值大小基本可行。

2.1.2.2 气液分离

气液分离时旋风子除液效率随工作截面风速增大而降低,因此,设计时以旋风子工作截面风速不大于 3.5 m/s 为基本原则,并考虑分离器旋风子实际数量的限制,设计过程同气固分离^[2]。

湿气压缩机前置旋流分离器旋流分离元件联合国内厂家自行设计,旋流分离由中国石油大学(华东)编制软件完成计算,并进行了实物分离模拟。

2.2 钛制大型天然气海水冷却器

天然气经过湿气压缩机强力压缩后,温度升高,进入下一道工艺流程前需要进行冷却降温。天然气海水冷却器是利用清洁、环保、廉价的海水来冷却天然气的管壳式换热装置(图 2),采用管内和管外单相强制对流换热理论研制而成,是典型的间壁式换热装置。海水冷却器受压部件工作在海水和含 CO_2 湿天然气的腐蚀环境中,所以,其良好的耐蚀性、抗振性和经济性是产品研制的关键技术问题。

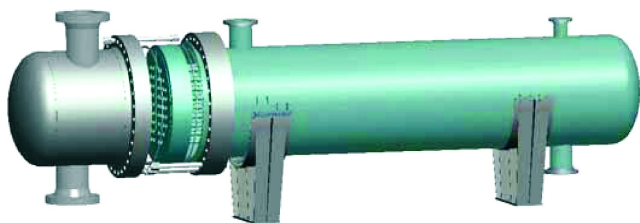


图 2 天然气海水冷却器的三维模型图

海水冷却器研制关键技术:

1)在选材方面,采用 TA2 材料的全钛壳体、管板、管束和 $16 \text{ Mn} + \text{TA}2$ 、 $16 \text{ MnR} + 316 \text{ L}$ 等复合材料,从根本上解决了海水和 CO_2 的腐蚀问题。

2)在连接结构设计方面,采用同材对接焊、角焊、对接焊+条衬双密封焊和异材爆炸焊、螺纹连接等技术,解决了产品连接结构的耐蚀性问题。

3)在结构设计方面,壳侧法兰采用 $16 \text{ Mn} + \text{TA}2$ 衬环形式的松套法兰结构,大幅降低了产品的制造成

本。管侧法兰采用 $316 \text{ L} + 16 \text{ Mn}$ 复合材料的壳体及整体法兰结构,解决了管箱的耐压和防腐问题。

4)在抗振结构设计方面,为防止高速流动的海水横向冲刷管束时诱导管束振动,采用了折流板缺口区不布管和管束施加支撑板的设计方式,提高了管束的整体固有频率,消除了管束的振动倾向。此外,为防止管束进口处受海水的强力冲刷受损或引起管束剧烈振动,在管束进口处还装设了防冲板。

2.3 干气密封系统

干气密封系统对于湿气压缩机来说至关重要,压缩机依靠高压干气进行密封,干气压力不够将磨损和损坏湿气压缩机。以往项目干气密封设备依赖进口,且其体积大、费用高、采办周期长。通过研究采用国产航天使用的高压气体压缩设备,其设计流程简洁,操作方便、可靠,维护工作量少,占地小,投资省,采办周期短。

干气密封增压系统以 3 台增压设备并联的形式,将 $10.0 \text{ m}^3/\text{min}$ 、 6.8 MPa 的天然气增压至 8.4 MPa 后输出。系统核心为 3 台气动气体增压泵,其为空气驱动、无油、无润滑、自冷却、体积小、重量轻、结构紧凑、工作可靠的增压设备。系统采取气体驱动方式,驱动设备运行的气源为 0.8 MPa 的压缩空气。系统启动方式为手动,并在天然气输出压力达到 8.4 MPa 时自动停机,而在天然气输出压力低于 7.6 MPa 时自动开机。系统采用封闭式不锈钢金属外壳,并配有便于观测的控制面板。

2.4 湿气压缩机“一控三”监控系统

湿气压缩机三级串联运行操作非常复杂,为便于现场的阀门动作监控、机组运行状态监视和就近操作控制,监控系统采用就地控制盘的监控方式,同时在东方 1-1 气田 MCC 房增加监控终端,以达到在 MCC 进行透平参数监控的目的。应用“一控三”技术,仅增加 1 套监控装置,进行切换显示和同时显示,实现 3 台机组的同时监视和控制。

湿气压缩机“一控三”监控系统,由一套非工控机电脑和标准 TT4000 人机界面软件组成,显示单元通过友好的人机界面执行多功能的系统显示^[3]。人机界面同时监控透平和压缩机的各参数,计算执行因素,报告报警,显示运行状态,存储数据,并执行一系列广泛的分析计算。通过在湿气压缩机现场控制盘安装 1784-CNBR 通信模块,使用 RG6 同轴电缆连接到 MCC 监控终端,并通过 VDU 的 TT4000 多机组显示软件进行切换显示和同时显示,实现 3 台机组的同时监控。

3 相关工程施工调试技术创新

3.1 内循环完成单机调试技术

湿气压缩机单机常规调试方法会使用单独的循环调试工艺流程,需要安装大型精密空气滤器利用空气进行调试。而东方 1-1 气田海上现场无法满足上述条件,且为了单机调试停产代价也太大。为此,结合海上现场实际情况以及项目的工艺特点,从高氮井引出 1 条管线注入压缩机单机工艺流程,修改湿气压缩机软件,使用入口旋流分离器和出口海水冷却器,通过喘振阀形成小循环进行运转调试,实施精确控制,以实现单机性能测试。具体流程为:①临时从高氮井引出 1 条管线,接入压缩机组加载阀前;②旁通旋流分离器 2 个腔室的液位信号 LALL 和 LAL;③打开加载阀,对系统进行扫线、冲压,当系统压力上升到设定压力时停止冲压;④对机组进行功能测试;⑤检查记录燃料气的用量;⑥取样化验,检查旋流分离器的处理效果。

3.2 组装式吊机实施海上吊装技术

湿气压缩机工程需要将 3 台旋流分离器(34 t)和 3 台海冷却器(19 t)吊装到东方 1-1 气田 CEP 平台上。海上施工船舶资源紧张,气田附近无作业船舶。如果从别的海域调遣合适的施工船舶,费用会特别大。经研究,采用组装式吊机来进行设备吊装,可满足设备吊重、项目进度、费用等要求。

3.2.1 吊机安装位置的选择

将组装式吊机(11 t)吊上平台需要平台南侧吊机(15 t)来进行。

3.2.2 平台加固

通过建模分析和计算可知,需要在中层甲板至顶层甲板间需要进行斜撑加固。

3.2.3 外加平台的局部割除

平台南侧中层甲板相对顶层甲板没有外飘,顶层甲板边缘梁距离主承重梁 7 m,另外在 A0 梁外侧后增加一个 3 m 宽 10 m 长的吊货甲板,组装式吊车安装在 A0 轴北 3 m 的位置上(即 A 和 A0 轴之间),吊装时需要割下 1 m² 的一块甲板,吊车才能进行吊装作业。割除甲板断面需用钢板焊接进行防护措施,以便吊装作业时对吊机钢丝绳进行保护。

3.2.4 吊索具的选择

1)旋流分离器^[4]:单件分离器重量为 30.148 t,考虑挂绳、吊高、平台设施等,选择 6 m 长钢丝绳,每个分离器配 2 条绳,仰角为 81.9°,每条钢丝绳受力为 15.2 t,选择 $\varnothing 42$ mm \times 6 m 钢丝绳,破断力为 183 t,此时安全系数 $n > 6$ ($183 \div 15.2 = 12.0$)。

2)海水冷却器:单件重量为 19 t,选择 15 t \times 10 m 的吊带,中间用 5 t 倒链调平,穿绳后绳长及仰角为 70° 和 78.5°,吊带受力为 12.4 t。选择 15 t \times 10 m 的吊带,破断力为 90 t,此时安全系数 $n > 6$ ($90 \div 12.4 = 7.2$)。

3.2.5 吊机和设备的装船

海上吊装时受天气和海况等因素的影响较大,考虑到运输船在吊装和待命期间的稳定性和安全,须注意配载。运输船配载时应充分考虑先吊装的设备离船后,剩下设备对运输船稳定性的影响,因此,需要确定设备吊装的顺序。同时,由于旋流分离器设备高近 10 m,以往的海上吊装都采用驳船进行运输,而本次吊装没有驳船资源,采用了拖轮进行运输,因此,做了大量细致的设计和安装固定工作。设备采用硬连接方式固定,固定支架与拖轮甲板焊接固定。

3.2.6 吊机的组装

吊机部件由平台南侧吊机吊上平台并协助组装。组装顺序为:吊机导轨、底座、机体和扒杆。

3.2.7 吊机、平台固定及吊重测试

吊机轨道与平台固定之前需要进行计算确定设备吊装过程是否满足规范和安全要求。吊机安装完毕后,必须进行吊重测试,试验方法如下:在吊机导轨长度方向内,选择一个合适位置的结构点,(强度足够)焊接一吊耳,根据吊机性能曲线及该点至吊机中心的距离(吊装半径),查出吊机吊重数值,以 1.25 倍的系数乘以该数值,作为测试值,只要在此吊装半径内,起吊时,吊机计力器显示出该数值而吊机无异常即为测试合格。

3.2.8 设备吊装

为了不影响东方 1-1 气田 CEP 平台生产,设备吊装在不停产的条件下进行。拖轮靠泊之后,按顺序对设备进行解焊、吊离。设备吊上平台之后,需要进行推拉移位,将设备移到最终安装位置。

3.3 电气系统不停产改造技术

湿气压缩机工程低压柜电气改造是项目的关键点,只有其改造完成,才能进行湿气压缩机辅助系统设备调试投用等工作。考虑到东方 1-1 气田抗停产能力弱,气田负荷较小,主要设备一用一备可以通过 A/B 母排切换实现改造工作,进行低压柜电气不停产改造,避免停产造成减产^[5]。

低压柜电气改造主要工作内容有:新增 1 个馈电柜,与低压柜 LB 母线连接;旧开关柜进行 22 个抽屉回路的改造。通过实施可拆卸式组装的安装方式,2 个 8E 抽屉合并为 16E 抽屉工作直接可以通过不停电进行改造。新增开关柜和 21 个开关抽屉在工厂内生

产改造完成。

3.4 总体配管优化技术

1) 采用三维设计软件 PDMS 搭建 1:1 的设备、结构和管线模型。东方 1-1 气田二期开发工程项目湿气压缩机工程引进三维设计软件 PDMS, 在项目的设计中避免了很多大尺寸管线、设备、支架的碰撞问题, 方便指导项目施工作业。三维模型和现场照片对照情况见图 3。

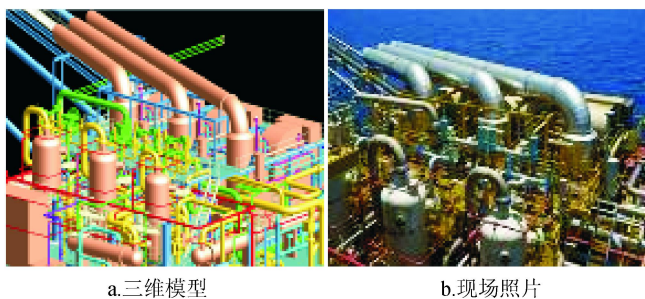


图 3 三维模型和现场照片对照情况图

2) 总体布置因地制宜。东方 1-1 气田上层甲板预留位置平面空间有限, 东方 1-1 气田二期开发工程项目湿气压缩机工程充分利用上层甲板空间高度的优势, 在湿气压缩机、前置旋流分离器和海水冷却器的上方以及安全阀平面设计甲板, 搭建二层平台, 布置管线、阀门、设备, 同时便于以后生产人员的操作和维修。

3) 采用 CAESARII 应力分析软件, 圆满解决应力问题。湿气压缩机为大型动设备, 且管线尺寸很大(管径为 406.4~609.6 mm), 而湿气压缩机对应力要求非常苛刻, 东方 1-1 气田二期开发工程项目湿气压缩机工程引进 CAESARII 应力分析软件, 并结合 PDMS 三维软件调整管线走向, 减少设备管嘴的应力集中, 为设备的正常运转提供了有力的保障。管线应力分析三维效果及现场 WGC 进出口连接情况见图 4。

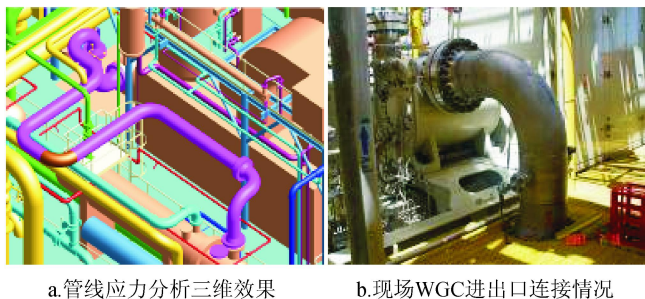


图 4 管线应力分析三维效果及现场 WGC 进出口连接情况图

4) 通过优化设计较好指导停产改造。湿气压缩机工程 90% 的施工在海上完成, 整个湿气压缩机工程施

工无停产。整个改造设计由于利用了 PDMS 三维软件, 管线设计详细、周密、空间利用合理, 较好地指导了停产施工方案, 并提前完成停产作业, 大大降低了由于停产而造成的经济损失。

5) 利用氮气进行试压和气密试验, 避免了压缩机进水问题。

6) 压缩机出口压力变送器和温度变送器安装优化设计。在有限的空间内, 兼顾生产人员的观察、操作和维修方便, 对压缩机出口压力变送器和温度变送器安装位置进行优化设计, 达到了良好的效果。

7) 优化设计湿气压缩机底座架空管线路径, 避免碰撞。由于透平驱动高压大容量湿气压缩机三级串联管线异常复杂, 而机组本身底部也是管线密布, 结合工艺整体设计, 工程采用湿气压缩机底座架空设计, 优化管线路径, 避免碰撞, 有效利用高度空间, 下方铺设管线路径, 避免碰撞, 有效利用高度空间, 下方铺设管线路径, 上方铺设格栅板形成操作平台, 对机组进行操作和维修, 效果良好。

4 结论

2007 年 6 月, 东方 1-1 气田二期开发工程项目湿气压缩机工程投产至今, 透平湿气压缩机运行状况一直良好, 每天增产天然气 $(40 \sim 120) \times 10^4 \text{ m}^3$ 。该工程为海上第二个湿气压缩机工程项目, 亚洲第一个透平驱动大功率高压湿气压缩机三级串联工艺项目, 满足了项目复杂工艺工况的要求, 推进了设备国产化, 通过自主设计、施工优化创新, 使整体费用为同类合作项目的 1/3, 效益显著。

参 考 文 献

- [1] 中海石油研究中心. 东方 1-1 气田开发工程项目总体开发方案[R]. 北京: 中海石油研究中心, 2001.
- [2] 胡辉, 周声结, 孙河生, 等. 前置旋流分离器旋风管特性及数量确定[J]. 油气田地面工程, 2012, 5(16): 89-90.
- [3] 胡辉, 周声结, 李大全. 湿气压缩机“一控三”监控终端改造研究[C]//2010 年广东省石油学会优秀学术论文集. 广州: 广东省石油学会, 2010.
- [4] 贺莹, 胡辉, 周声结, 等. TC-90 组装式吊机在南海西部海域海上吊装的应用[C]//2009 年广东省石油学会优秀学术论文集. 广州: 广东省石油学会, 2009.
- [5] 胡辉, 周声结, 李大全. 东方 1-1 气田电气不停产改造应用[C]//2009 年度工程建设论文集. 湛江: 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 2009.